植物生态学报　2016, **40** (3): 0–0　doi: 10.17521/cjpe.2015.0199
Chinese Journal of Plant Ecology　http://www.plant-ecology.com

广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素

杜　虎[1,2]　曾馥平[1,2*]　宋同清[1,2]　温远光[3]　李春干[3,4]　彭晚霞[1,2]　张　浩[1,2]　曾昭霞[1,2]

[1]中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室，长沙 410125; [2]中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站，广西环江 547100; [3]广西大学林学院，南宁 530004; [4]广西林业勘测设计院，南宁 530004

摘　要　为阐明广西区森林土壤有机碳密度分布格局及其主要影响因素，基于森林资源清查资料和345个调查样地土壤数据，估算了广西区主要森林土壤有机碳储量，采用地统计学方法描绘了土壤有机碳密度的空间分布，并利用主成分分析和逐步回归分析方法分析了影响土壤有机碳密度的主要因子。结果表明: 广西区主要森林土壤有机碳储量(0–100 cm)达到1686.88 Tg, 土壤有机碳密度为124.70 Mg·hm^{-2}，低于全国森林土壤平均水平。广西主要森林土壤有机碳密度最佳拟合模型为指数模型，呈中等强度空间相关，Kriging插值显示土壤碳密度高值区在东北区域，低值区在西北区域，表现为喀斯特区域低，非喀斯特区域高的特点。广西主要森林土壤碳密度在不同植被类型和土壤类型下表现出一定差异，其中竹林>落叶阔叶林>暖性针叶林>常绿落叶阔叶林>常绿阔叶林，黄壤>红壤>赤红壤>石灰土。主成分分析和逐步回归分析结果发现土层深度、经纬度、海拔是影响广西森林土壤有机碳的主要因子，其中以土层深度影响最大，主要受岩溶地貌的影响。

关键词　土壤有机碳; 空间异质性; 影响因子; 森林类型; 广西

引用格式: 杜虎，曾馥平，宋同清，温远光，李春干，彭晚霞，张浩，曾昭霞 (2016). 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素. 植物生态学报, 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0199

Spatial pattern of soil organic carbon of the main forest soils and its influencing factors in Guangxi Province, China

DU Hu[1,2], ZENG Fu-Ping[1,2*], SONG Tong-Qing[1,2], WEN Yuan-Guang[3], LI Chun-Gan[3,4], PENG Wan-Xia[1,2], ZHANG Hao[1,2], and ZENG Zhao-Xia[1,2]

[1]Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; [2]Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; [3]Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China; and [4] Guangxi Forest Inventory & Planning Institute, Nanning 530004, China

Abstract

Aims　Our objectives were to study the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) density and its influencing factors in the main forest ecosystems in Guangxi province.

Methods　A total of 345 sample plots were established in Guangxi, and the size of each plot was 50 m × 20 m. Based on the forest resource inventory data and field investigation, the SOC storage of the main forests in Guangxi was estimated. Geostatistics was applied to analyze the spatial pattern of SOC density and the main influencing factors on SOC density were also explored by principal component analysis and stepwise regression.

Important findings　The total SOC storage in the main forests in Guangxi was 1686.88 Tg, and the mean SOC density was 124.70 Mg·hm^{-2}, which is lower than that of China. The best fitted semivariogram model of SOC density was exponential model, and the spatial autocorrelation was medium. The contour map based on Kriging indicated that northeastern Guangxi had high SOC density and northwestern Guangxi had low SOC density, which corresponded to high SOC density in non-karst region and low SOC density in karst region. The SOC density followed the sequence of bamboo forest > deciduous broadleaf forest > warm coniferous forest > mixed evergreen and deciduous broadleaf forest > evergreen broadleaf forest, and yellow soil > red soil > lateritic red soil > limestone soil. The dominant environment factors affecting SOC density included soil depth, longitude, latitude, and altitude . Soil depth was the most influential factor, which was mainly attributed to the karst landscape.

Key words　soil organic carbon; spatial heterogeneity; influencing factor; forest type; Guangxi

收稿日期Received: 2015-06-03　接受日期Accepted: 2015-12-27

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: fpzeng@isa.ac.cn)

Citation: Du H, Zeng FP, Song TQ, Wen YG, Li CG, Peng WX, Zhang H, Zeng ZX (2016). Spatial pattern of soil organic carbon of the main forest soils and its influencing factors in Guangxi Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology,* 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.0199

森林生态系统作为陆地生态系统的主体，在维护全球气候系统、调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用(罗云建等, 2009; Pan *et al*., 2011)。森林土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分，主要来自于地表森林枯枝落叶和地下植物根系的分解补充与累积(邵月红等, 2005)，森林土壤生态系统的碳汇、源功能在陆地生态系统碳循环中起着十分重要的作用(黄从德, 2009)。森林土壤有机碳的积累和分解影响着土壤有机碳库的时空变化，直接或间接影响着陆地生物碳库和全球碳平衡(杜有新等, 2013)。大量研究表明土壤有机碳储量受气候、植被、土壤属性等环境、生物和人为因素的共同控制。因此，开展森林土壤有机碳储量的估算、揭示其影响因素对全球森林生态系统碳循环研究及森林生态系统碳汇管理具有重要意义。我国学者在不同尺度上对土壤有机碳库研究已取得一些成果。王绍强等(1999)、周玉荣等(2000)、解宪丽等(2004)、于升东等(2005)对中国土壤有机碳库进行了估算，省域尺度上，黄从德等(2009)、王新闯等(2011)、高阳等(2014)、李斌等(2015)分别对四川、吉林、宁夏、湖南及东北林区森林土壤有机碳库进行了研究。广西地处中国南疆，地跨北热带、南亚热带、中亚热带3个生物气候带，具有气候温和、热量充足、雨量充沛的气候特点，非常适宜森林植物的生长(农胜奇, 2014)。广西第八次森林资源清查结果表明，全区森林面积达到1509.75 hm^2，森林覆盖率为56.51%，活立木总蓄积5.58 × $10^8 m^3$，其面积和蓄积均位于中国前列，是中国重要的林业大省。为此，我们基于样地调查和森林资源清查资料相结合的方法，对广西区主要森林生态系统土壤碳密度、空间分布特征及影响因素进行研究，以期为区域森林生态系统固碳现状评价、碳汇林业与持续管理策略制定提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区，地理位置104.43°–112.07° E、20.90°–26.40° N，总面积23.67万km^2，处于云贵高原东南边缘，两广丘陵的西部，南边朝向北部湾，整个地势为四周多山地与高原，而中部与南部多为平地，地貌为山地丘陵性盆地地貌，属于亚热带季风气候区，全区各地极端最高气温为33.7–42.5 ℃，极端最低气温为–8.4–2.9 ℃，年平均气温16.5–23.1 ℃，各地年降水量均在1070 mm以上，大部分地区为1500–2000 mm，4–9月为雨季，其降水量占全年降水量的70%–85%。研究区植被类型多样，植物物种丰富，以常绿树种为主，植被区域主要为亚热带常绿阔叶林区域。全区森林资源主要包括杉类、松类、柏类、桉类、栲类、青冈类、软阔类(火力楠(*Michelia macclurei*)、枫香树(*Liquidambar formosana*)、拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)等)、经济林(荔枝(*Litchi chinensis*)、龙眼(*Dimocarpus longan*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、八角(*Illicium verum*)、板栗(*Castanea mollissima*)、李(*Prunus salicina*)等)、竹类、城市森林、石山林等类型(杜虎等, 2014)。根据《广西森林资源规划设计调查技术方法》及广西第8次森林资源清查数据，本研究所涉及松树林(A)、杉木林(B)、桉树林(C)、栎类(D)、硬阔林(E)、软阔林(F)、石山林(G)、竹林(H)、八角林(I)、油茶林(J) 10类林型占广西区森林总面积的90.62%，蓄积的98.81%，各林型主要树种见表1。

1.2 样方建立与植被调查

根据《中国森林生态系统固碳现状、速率、和潜力研究调查规范》，采用网格法进行样点数量确定。广西所在亚热带区域每个网格面积为100 km^2，全区森林总网格数为1509.75个，其中调查网格占森林总网格数的2.5%，按每个网格内约布置3个样点，本研究计划设置115个调查样点。基于广西第8次森林资源清查数据和《广西森林资源规划设计调查技术方法》中林龄、林组划分标准，计算本研究各林型幼龄林(I)、中龄林(II)、近熟林(III)、成熟林(IV)、过熟林(V)5个不同林龄在广西各县(市)的面积、蓄积综合权重，选择权重最大的县(市)进行样点分配，每个样点建立同一林型、同一林龄的3块重复样地，各样地的立地条件基本一致，相互距离>100 m，样地大小为1000 m^2(50 m × 20 m)，各样地分布见图1。对样地内林木的胸径、树高、冠幅和坐标进行每木调查。同时按“品”字型在样地内设置3个2 m × 2 m

表1 研究区林型及主要树种
Table 1 The forest types and main tree species in the study area

森林类型 Forest types	主要树种 Main tree species
松树林 Pine forest (A)	马尾松 *Pinus massoniana*
杉木林 China fir forest (B)	杉木 *Cunninghamia lanceolata*
桉树林 *Eucalyptus* forest (C)	尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*、大桉 *Eucalyptus grandis*、巨尾桉 *Eucalyptus grandis* × *urophylla* 等 *et al*.
栎类 Quercus forest (D)	青冈 *Cyclobalanopsis glauca*、麻栎 *Quercus acutissima*、白栎 *Quercus fabri*、大叶栎 *Quercus griffithii* 等 *et al*.
硬阔林 Hardwood forest (E)	格木 *Erythrophleum fordii*、蚬木 *Excentrodendron hsienmu*、金丝李 *Garcinia paucinervis* 等 *et al*.
软阔林 Softwood forest (F)	枫香树 *Liquidambar formosana*、喜树 *Camptotheca acuminata*、木荷 *Schima superba*、米老排 *Mytilaria laosensis*、栲树 *Castanopsis taiwaniana* 等 *et al*.
石山林 Forest in limestone (G)	青冈 *Cyclobalanopsis glauca*、肥牛树 *Cephalomappa sinensis*、香椿 *Toona sinensis*、任豆 *Zenia insignis*、金丝李 *Garcinia paucinervis* 等 *et al*.
竹林 Bamboo (H)	毛竹 *Phyllostachys edulis*、麻竹 *Dendrocalamus latiflorus*
八角林 Anise forest (I)	八角 *Illicium verum*
油茶林 Oil-tea camellia forest (J)	油茶 *Camellia oleifera*

的小样方, 调查所有灌木种类、株丛数、高度、基径、覆盖度, 在每个2 m × 2 m的小样方内各取1个1 m × 1 m的小样框, 调查草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度(杜虎等, 2014)。

1.3 土壤取样与分析

样地调查时将1000 m^2(50 m × 20 m)样地划分为10个10 m × 10 m的网格, 采用土钎法测定10 m × 10 m网格交汇处土壤深度, 各点平均深度用于后续碳储量估算。在每个样地中挖取一个典型剖面, 用环刀按0–10、10–20、20–30、30–50、50–100 cm分层测容重。在样地4个角和中间用土钻法按土壤机械分层取样, 5个点同一层次的图样混合成一个土样。样品取完后带回实验室置于阴凉处自然风干, 用四分法取土过筛, 供有机碳分析测定。土壤碳采用重铬酸钾-浓硫酸氧化外加热法测定(鲍士旦, 2000)。

1.4 数据处理

根据实验室分析得到的各土壤层的碳含量、土壤容重及石砾含量, 按土壤取样层次计算单位面积各层土壤碳密度; 各土壤层碳密度之和, 即该林地土壤的总碳密度, 单位为Mg·hm^{-2}。

土壤碳密度(Mg·hm^{-2})= [土壤容积密度(g·cm^{-3})×土层深度(cm)×石砾含量(%)×对应的碳含量] × 100。

利用统计软件SPSS 18.0进行单因素方差分析(ANOVA)、Pearson相关分析和逐步回归分析。采用GS^+软件进行半方差函数模型拟合, 在ArcGIS 9.3软件中采用普通克里格插值法绘制有机碳密度的空间分布图。

2 结果和分析

2.1 广西主要森林土壤有机碳密度

由表2可知, 广西区主要森林不同林型各林龄阶段土壤有机碳密度均不同。松树林、杉木林、桉树林、栎类、软阔林、硬阔林、石山林、竹林、八角林、油茶林土壤有机碳密度分别为78.05–136.52、117.5–206.62、87.19–164.94、47.91–107.99、120.54–335.27、117.33–294.54、51.75–81.21、128.19–187.65、87.23–147.85、78.37–103.85 Mg·hm^{-2}。松树林成熟林土壤有机碳密度最高, 显著高于幼龄林、中林龄, 中龄林最低, 显著成熟林、过熟林; 杉木林土壤有机碳密度为近熟林、成熟林、过熟林显著高于幼龄林和中龄林; 桉树林近熟林土壤有机碳密度显著高于幼龄林、成熟林、过熟林, 过熟林显著低于中林龄; 栎类过熟林土壤有机碳密度显著高于成熟林; 硬阔林近熟林土壤有机碳密度显著低于幼龄林、成熟林和过熟林; 软阔林成熟林土壤有机碳密度显著高于其他林龄, 过熟林显著高于幼龄林; 八角林中林龄土壤有机碳密度显著高于幼龄林; 石山林、竹林及其他林型其他林龄阶段差异不显著。

由广西主要树种(组)各林龄单位面积土壤总碳储量(碳密度)和其所占面积可估算各树种(组)在广西的土壤总碳储量。如图2所示, 广西主要林型土壤碳储量大小顺序为硬阔林(415.29 Tg) >软阔林(282.53 Tg) >松树林(260.61 Tg) >杉木林(205.43 Tg) >桉树林(199.08 Tg) >石山林(159.20 Tg) >竹林(57.19 Tg) >八角林(56.32 Tg) >油茶林(26.97 Tg) >

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0199

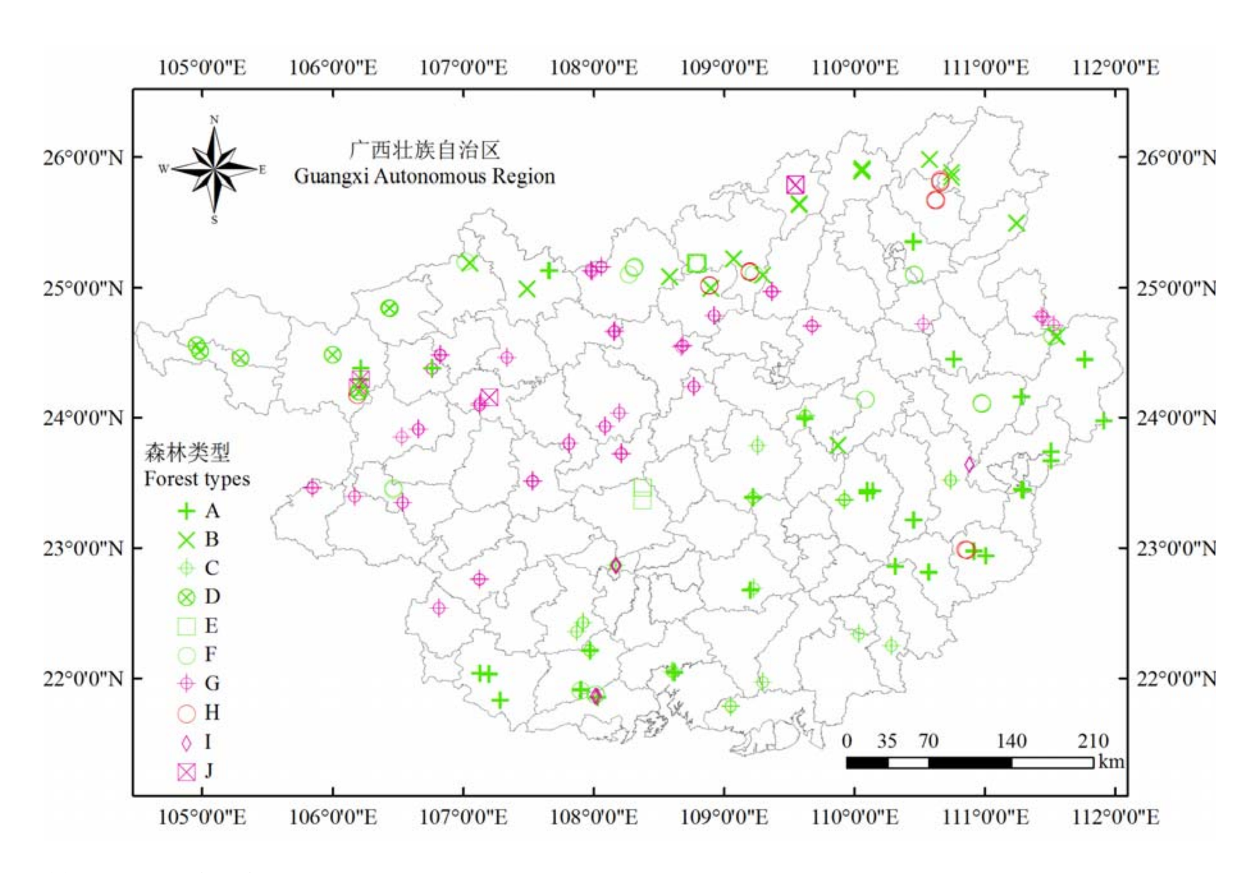


图1 样地分布图。森林类型同表1。
Fig. 1 The maps of sampling plots. Forest types see Table 1.

表2 不同林型各林龄阶段土壤有机碳密度
Table 2 Soil organic carbon density in different forest types with different stand ages

林型 Forest types	幼龄林 Young forest (I)	中龄林 Middle-age forest (II)	近熟林 Near mature forest (III)	成熟林 Mature forest (IV)	过熟林 Over mature forest (V)
松树林 Pine forest (A)	96.66[bc]	78.05[c]	115.28[ab]	136.52[a]	116.1[ab]
杉木林 China fir forest (B)	149.24[b]	117.5[b]	206.62[a]	205.13[a]	204.73[a]
桉树林 Eucalyptus forest (C)	106.06[bc]	141.56[ab]	164.94[a]	111.05[bc]	87.19[c]
栎类 Quercus forest (D)	72.26[ab]	90.84[ab]	84.39[ab]	47.91[b]	107.99[a]
硬阔林 Hardwood forest (E)	250.17[a]	236.223[ab]	120.55[b]	325.94[a]	335.27[a]
软阔林 Softwood forest (F)	124.29[c]	117.33[bc]	150[bc]	294.54[a]	178.55[b]
石山林 Forest in limestone (G)	56.98[a]	67.76[a]	51.75[a]	71.09[a]	81.21[a]
竹林 Bamboo (H)	138.09[a]	187.65[a]	—	128.19[a]	—
八角林 Anise forest (I)	87.23[b]	147.85[a]	—	123.96[ab]	—
油茶林 Oil-tea camellia forest (J)	85.17[a]	103.85[a]	—	78.37[a]	—

同行不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。
Different lowercase letters within a row indicate significant difference at $p < 0.05$.

栎类(24.25 Tg), 其所占比例分别为24.62%、16.75%、15.45%、12.18%、11.80%、9.44%、3.39%、3.34%、1.60%和1.44% (图3)。广西主要林型土壤总碳储量为1686.88 Tg, 其平均碳储量为124.70 Mg·hm^{-2}。

2.2 广西主要森林土壤有机碳空间异质性

广西区主要森林土壤有机碳密度半方差函数拟合模型和相关参数如表3所示, 其最佳拟合模型为指数模型(Exponential), 决定系数R^2达到0.893。块金值与基台值的比值($C_0/(C_0 + C)$)为29.2%, 呈中等强度的空间自相关性, 表明广西区主要土壤有机碳密度主要受土壤母质、地形、气候等非人为的结构性因素影响较大。基于半方差函数理论模型及相关参数, 在ArcGIS 9.3的地统计分析模块中采用Kringing

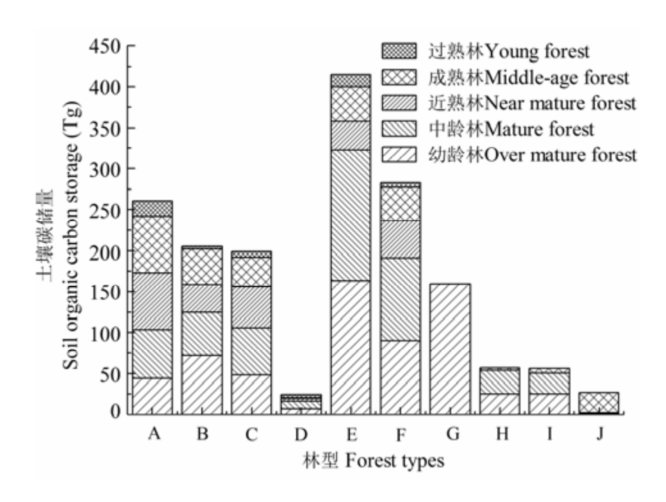


图2　广西各林型不同林龄土壤碳储量。森林类型同表1。
Fig. 2　Soil organic carbon storage of different forest types with different stand ages in Guangxi. Forest types see Table 1.

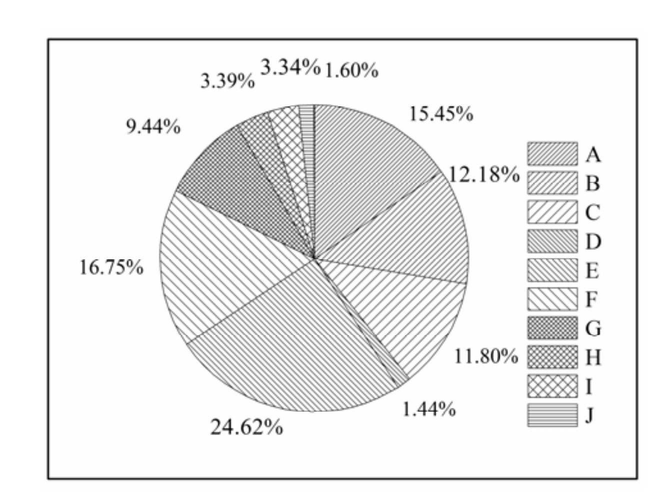


图3　广西各林型土壤碳储量比例。森林类型同表1。
Fig. 3　The proportion of soil carbon storage of each forest type out of total soil carbon storage in Guangxi. Forest types see Table 1.

表3　土壤有机碳密度半方差函数理论模型及其相关参数
Table 3　Variogram theory model of soil organic carbon (SOC) and their corresponding parameters

指标 Index	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget C_0	基台值 Still $C_0 + C$	块金效应 Nugget/Still C_0/ $C_0 + C$ (%)	变程 Range (°)	决定系数 Determination coefficient (R^2)
土壤有机碳密度 SOC density	指数模型 Exponential	0.107	0.366	29.2	1.109	0.893

最优内插法对研究区森林土壤有机碳密度进行插值, 能从全面和直观地反映广西区主要森林土壤有机碳密度的水平空间分布(图4)。由图可知广西主要森林土壤碳密度在21.79–312.52 Mg·hm^{-2}之间, 具有一定的空间分布规律。土壤碳密度高值区出现在广西东北部区域, 该区域分布有大面积杉木林; 桂东松树林区也存在一定的高值区; 桂南地区土壤碳密度相对较高; 而土壤碳密度的低值区主要出现在广西中部, 该区域分布有大面积喀斯特地貌。

2.3　广西主要森林土壤有机碳密度影响因素

2.3.1　生物因子

广西主要森林所属植被类型主要包括常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、暖性针叶林和竹林。通过对广西主要植被类型土壤碳密度比较发现(图5), 各植被类型土壤碳密度分别为109.19、113.07、150.77、135.40和153.80 Mg·hm^{-2}, 其中落叶阔叶林和竹林土壤碳密度显著高于常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林, 其它植被类型间差异不显著。

简单相关分析发现广西区主要森林土壤有机碳密度与林分平均胸径存在一定的相关性(R^2=0.174, P=0.001), 回归分析结果表明土壤有机碳密度与胸径之间呈抛物线的变化趋势(图6), 随着林分胸径的增大, 土壤有机碳密度表现为先增后减的趋势。

2.3.2　环境因子

广西区主要森林土壤主要包括赤红壤、红壤、黄壤和石灰土4大类。赤红壤主要分布于广西南部的南亚热带地区, 红壤主要分布于广西东北部和西北部, 黄壤主要分布于广西北部地区, 石灰土主要分布于广西中部和西南部。研究表明广西森林赤红壤、红壤、黄壤和石灰土土壤有机碳密度分别为111.03、149.58、172.78和66.40 Mg·hm^{-2}, 石灰土土壤碳密度明显低于其他土壤类型, 各类型间差异均达到了显著水平(图7)。

广西主要森林土壤有机碳密度与环境因子的相关分析见表4。由表可知, 土壤有机碳密度与年均温、海拔、经纬度、土层厚度、表层土壤有机碳含量存在显著的相关性(P<0.01)。由于各环境因子之间具有较强的相关性, 存在交互作用, 不能独立体现各影响因子对SOC密度的贡献大小。因此可通过主成分分析提取影响土壤碳密度的主要因子(表5), 结果表明, 影响广西主要森林土壤有机碳密度环境因子的第1、2、3主成分方差累计贡献率达到74%, 能反映环境因子对土壤有机碳密度影响效应的大部

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0199

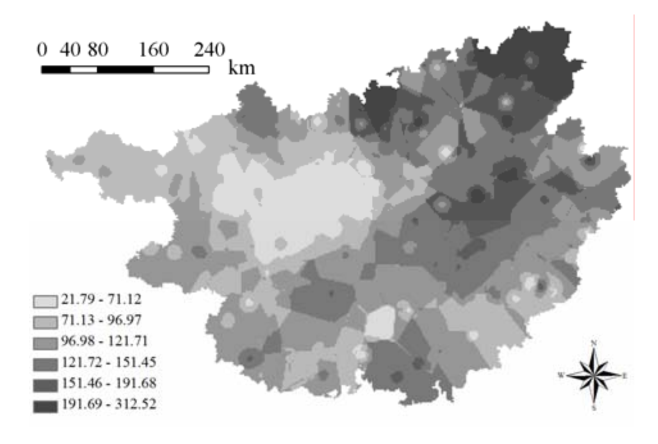


图4 广西主要森林土壤碳密度空间分布(Mg·hm^{-2})。
Fig. 4 Spatial distribution of soil organic carbon density of the main forests in Guangxi (Mg·hm^{-2}).

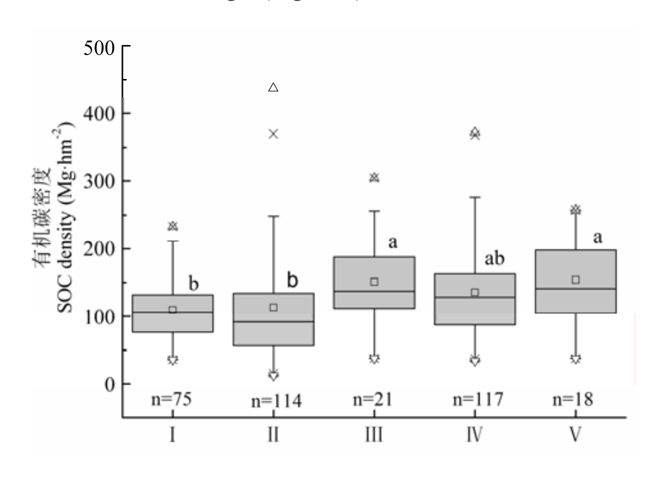


图5 不同植被类型土壤有机碳密度。I、II、III、IV、V分别表示常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、暖性针叶林、竹林。茎箱图框内横线表示平均值, 箱上下线分别表示第一四分位数和第三四分位数。
Fig. 5 Soil organic carbon density under different vegetation types. I, II, III, IV, V represent evergreen broadleaf forest, mixed evergreen and deciduous broadleaf forest, deciduous broadleaf forest, warm coniferous forest, and, bamboo forest, respectively. Lines within the boxes give the median, and boxes give the 25th and 75th percentiles.

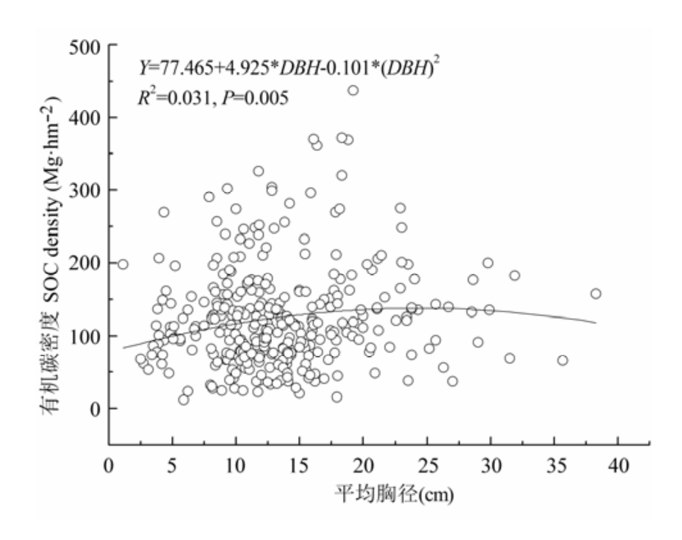


图6 平均胸径对土壤有机碳密度影响。
Fig. 6 Relationship between the average diameter at breast high (*DBH*) and soil organic carbon (SOC) density.

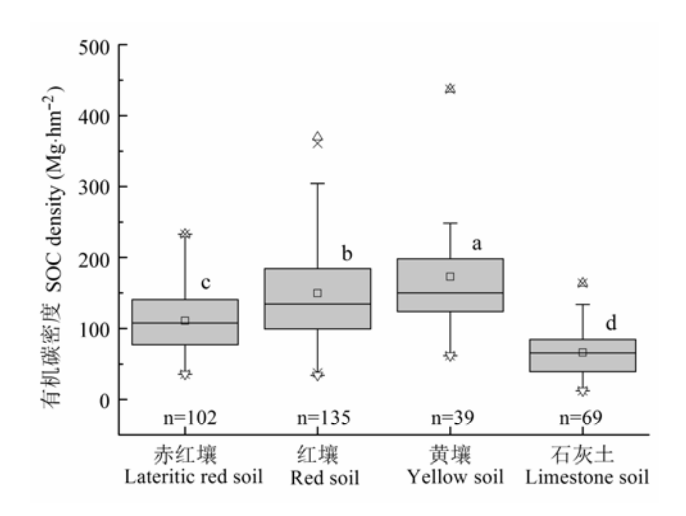


图7 不同土壤类型土壤有机碳密度。I、II、III、IV、V分别表示常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、暖性针叶林、竹林。茎箱图框内横线表示平均值, 箱上下线分别表示第一四分位数和第三四分位数。
Fig. 7 Soil organic carbon (SOC) density under different soil types. I, II, III, IV, V represent evergreen broadleaf forest, mixed evergreen and deciduous broadleaf forest, deciduous broadleaf forest, warm coniferous forest, and, bamboo forest, respectively. Lines within the boxes give the median, and boxes give the 25th and 75th percentiles.

分信息; 第1主成分与年均温、纬度有较大相关性, 方差贡献率为28.845%; 第2主成分与土层厚度和pH有关, 方差贡献率为23.3%; 第3主成分与海拔和经度相关, 方差贡献率为22.274%。

为揭示各环境因子对土壤有机碳密度贡献大小, 利用逐步回归分析方法对主成分指标(年均温、海拔、经度、纬度、土层厚度、pH值)进行筛选, 可得到土壤有机碳密度(因变量)与环境因子(自变量)的多元线性回归方程:

$$SOCD = 1.070D + 16.065La + 0.04Al + 6.654Lo – 1089.946 \quad (R^2 = 0.401, p < 0.001)$$

式中, *SOCD*为土壤有机碳密度(Mg/hm^2); *D*为土层深度(cm); *La*为纬度(°); *Al*为海拔(m); *Lo*为经度(°)。其中土层深度与土壤有机碳密度关系最为密切(β = 0.49), 其次是纬度(β = 0.275)、海拔(β = 0.187)、经度(β = 0.157)。因此广西森林土壤有机碳密度是不同因子综合影响的结果。

表4 土壤有机碳密度和各环境因子间的相关性
Table 4 Correlation coefficients between soil organic carbon (SOC) density and environment factors

	SOC密度 SOC density	年平均气温 Annual mean temperature	年降水量 Annual precipitation	海拔 Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	土层厚度 Soil depth	pH值 pH value
年平均气温 Annual mean temperature	–0.301**							
年降水量 Annual precipitation	0.093	–0.034						
海拔 Altitude	0.170**	–0.201**	–0.245**					
经度 Longitude	0.285**	–0.452**	0.340**	–0.420**				
纬度 Latitude	0.316**	–0.817**	–0.195**	0.426**	0.142**			
土层厚度 Soil depth	0.484**	0.054	0.292**	–0.137*	0.340**	–0.123*		
pH值 pH value	–0.038	–0.033	–0.050	–0.044	0.015	0.036	–0.148**	
表层土壤SOC含量 SOC content of surface soil	0.373**	–0.354**	–0.069	0.207**	0.078	0.370**	–0.293**	0.311**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

表5 环境因子主成分分析
Table 5 Principal component analysis of the effects of environment factors on soil organic carbon density

	第一主成分 Principal component 1	第二主成分 Principal component 2	第三主成分 Principal component 3
年平均气温 Annual mean temperature	–0.927	0.070	–0.167
年降水量 Annual precipitation	–0.035	0.228	0.624
海拔 Altitude	0.402	0.116	–0.780
经度 Longitude	0.393	0.160	0.804
纬度 Latitude	0.910	–0.071	–0.201
土层厚度 Soil depth	–0.001	0.893	0.259
pH值 pH value	0.189	–0.896	–0.023
表层土壤SOC含量 SOC content of surface soil	0.517	–0.402	–0.032
方差贡献率 Variance contribution	28.845	23.300	22.270
累计贡献率 Accumulative contribution (%)	28.845	52.146	74.416

3 讨论和结论

3.1 广西主要森林土壤碳储量

森林生态系统碳库主要包括活植物碳库、土壤有机碳库和死植物体碳库。土壤有机碳库是森林生态系统最为重要的碳库之一, 也是陆地生态系统容量最大但周转周期最慢的碳库(徐耀粘和江明喜, 2015)。土壤有机碳储量是评价森林生态系统吸收和固定CO_2功能的重要指标。广西主要森林土壤碳储量为1686.88 Tg, 其平均碳密度为124.70 Mg·hm^{-2}, 低于中国森林土壤碳密度平均水平(193.55 Mg·hm^{-2})(周玉荣等, 2000)和世界森林土壤碳密度平均水平(189.00 Mg·hm^{-2})(Dixon *et al*., 1994)。一方面由于亚热带较好的水热条件有利于植被生物量的积累; 另一方面, 亚热带土壤呼吸速率较大, 加之植被对土壤中养分大量吸收, 造成土壤碳储量相对较低(周玉荣等, 2000)。与邻近省份相比, 低于四川省(190.45 Mg·hm^{-2})(黄从德等, 2009)森林土壤平均碳密度, 接近张勇估算的滇黔桂地区土壤有机碳密度139.8 Mg·hm^{-2} (张勇等, 2008)。这是因为广西区分布有大量面积的石山林, 其平均土壤碳密度为65.76 Mg·hm^{-2}, 远低于广西平均水平, 其对全区土壤碳储量的贡献较小。

广西各主要林型对土壤有机碳储量的贡献不同, 硬阔林、软阔林、松树林、杉木林和桉树贡献比例均达到10%以上, 集中贡献了整个土壤碳储量的80%以上。研究不同森林类型的土壤有机碳储量, 可为制定最适宜土地利用方式以期增加土壤固碳潜力提供科学依据(黄从德等, 2009)。本研究表明, 广西各主要林型土壤有机碳密度差异比较大, 在65.76－253.63 Mg·hm^{-2}之间, 硬阔林、杉木林、软阔林、竹林土壤碳密度均高于广西土壤碳密度平均水平。这可能是因为不同森林类型树种组成不同, 其冠层的光合固定能力不同, 引起凋落物的种类、产量和

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0199

质量也不同, 从而对森林土壤碳汇/源功能产生不同的影响(黄从德等, 2009)。另外, 不同森林类型的结构不同, 林下的微气候差异可影响土壤微生物活性, 对土壤有机碳的积累产生较大影响(黄从德等, 2009)。

3.2 广西主要森林土壤碳密度空间格局

土壤是形态和演化过程都十分复杂的自然综合体, 受成土母质、地形、气候、植被等成土因素及人为干扰活动的影响, 具有复杂性和空间变异性(杜虎等, 2011)。土壤异质性是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。广西主要森林土壤有机碳碳密度半方差函数的块金效应($C_0/(C_0+C)$)为29.2%, 表现为中等程度空间相关性(Du *et al*., 2014), 表明广西区主要森林土壤有机碳密度主要受土壤母质、地形、气候等非人为的结构性因素影响较大, 而随机因素对其影响相对较小。广西主要森林土壤碳密度呈现出中部底, 四周高的空间格局, 桂西北大面积低值区主要与该区域分布着大面积喀斯特地貌有关, 其土层浅薄且不连续, 土壤总量远低于非喀斯特区域, 因此其总储量相对较低。

3.3 广西主要森林土壤碳密度影响因子

森林土壤碳动态主要取决于碳输入和输出之间的动态平衡, 有机碳的输入主要来源于植物枯枝落叶和死亡根系, 有机碳的输出主要源于土壤微生物对有机质的分解。一切能影响森林土壤有机碳积累与分解的因子都可能影响到森林土壤有机碳的分布。总体而言, 土壤有机碳储量的大小受植被、气候、土壤属性以及土地利用方式的变化等多种自然因素和人为因素的综合影响(李甜甜等, 2007)。

植被类型对土壤有机碳的影响主要由枯落物的质和量及根系作用而引起, 不同的植被类型枯落物的质和量及根系作用不同, 在土壤生物和微生物的作用下可形成不同质和量的土壤有机质, 影响着土壤有机碳的积累和周转(杜有新等, 2013)。研究表明, 在气候条件相同的情况下, 森林植被类型对凋落物的产量和分解速率均有显著影响, 进而造成不同森林植被类型间土壤有机碳密度存在差异(魏亚伟等, 2013)。本研究结果表明广西森林土壤有机碳密度表现为竹林、落叶阔叶林>暖性针叶林>常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林。这可能由于落叶阔叶林和竹林地表枯枝落叶积累丰富, 且竹林凋落物呈薄纸质, 更易于分解, 从而导致其土壤有机碳密度较高, 而针叶林下土壤有机酸的累积可抑制有机质的矿化, 有利于土壤有机质的积累。

土壤类型反映了成土母质、地形、水热条件的差异, 不同土壤类型成土过程不同, 土壤有机碳密度也有差异。广西区4类主要森林土壤有机碳密度差异显著, 表现为黄壤>红壤>赤红壤>石灰土。石灰土平均土壤碳密度仅为66.40 Mg·hm^{-2}, 分别是赤红壤、红壤、黄壤的0.6、0.44和0.38倍。石灰土作为我国亚热带区域非地带性土壤与黄壤、红壤、和赤红壤等地带性土壤差异明显, 前者风化程度高、土层深厚, 而石灰土成土过程缓慢、土层浅薄。本研究石灰土调查样地平均土壤深度仅24.78 cm, 而其他土壤类型基本能达到调查深度1 m, 因而造成石灰土所在区域土壤有机碳密度远低于其他3类土壤区。

广西主要森林土壤有机碳密度与主要环境因子逐步回归结果表明: 土层深度、纬度、海拔及经度对土壤有机碳密度的影响显著, 其中土层深度的影响最大, 主要因为广西区存在大面积土层浅薄的喀斯特区域。6个主成分环境因子联合解释了广西主要森林土壤有机碳密度变异的40.1%, 表明还有未考虑到的其它影响因素, 如土壤理化性状、土壤微生物性状、人为干扰等, 这些因素对森林土壤碳密度的影响不可忽略, 需要进一步分析。广西主要森林土壤碳密度的差异可能是森林类型、土壤类型、土层深度、地形、人为干扰等因子共同作用的结果。因此在进行大尺度森林土壤碳储量估算和土壤碳循环研究时, 应综合考虑植被、土壤、地形、人类活动等生物和环境因子。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205、XDA05070404)、国家自然科学基金项目(31370485、31370623和31400412)。

致谢 感谢广西壮族自治区林业勘测设计院提供的森林资源清查数据及对样点布置给予的帮助; 样地调查得到了中国科学院亚热带农业生态研究所植物生态学科组及广西大学林学院林学专业、生态专业等老师和学生的大力支持。在此一并致谢!

参考文献

Bao SD (2000). *Soil Agricultural Chemistry Analysis.* 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [鲍士旦(2000). 土壤农化分析. 第三版. 中国农业出版社, 北京.]

Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexier MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.

Du H, Song TQ, Peng WX, Wang KL, Liu L, Lu SY, Zeng FP (2011). Spatial heterogeneity of mineral compositions in surface soil in Mulun National Nature Reserve karst areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27, 79–84. (in Chinese with English abstract) [杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 曾馥平 (2011). 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性. 农业工程学报, 27, 79–84.]

Du H, Wang K, Peng W, Zeng F, Song T, Zhang H, Lu S (2014). Spatial heterogeneity of soil mineral oxide components in depression between karst hills, Southwest China. *Chinese Geographical Science*, 24, 163–179.

Du H, Zeng FP, Wang KL, Song TQ, Wen YG, Li CG, Peng WX, Liang HW, Zhu HG, Zeng ZX (2014). Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2712–2724. (in Chinese with English abstract) [杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞 (2014). 中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 34, 2712–2724.]

Du YX, Song ZX, He CL, Zhou SX, Huang Q (2013). Organic carbon content and influencing factors of different forest soils in Jiujiang, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 44, 575–579. (in Chinese with English abstract) [杜有新, 宋祖祥, 何春林, 周赛霞, 黄强 (2013). 江西九江地区森林土壤有机碳含量及其影响因素. 土壤通报, 44, 575–579.]

Gao Y, Jin JW, Cheng JM, Su JS, Zhu RB, Ma ZR, Liu W (2014). Carbon sequestration status of forest ecosystems in Ningxia Hui Autonomous Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 639–646. (in Chinese with English abstract) [高阳, 金晶炜, 程积民, 苏纪帅, 朱仁斌, 马正锐, 刘伟 (2014). 宁夏回族自治区森林生态系统固碳现状. 应用生态学报, 25, 639–646.]

Huang CD, Zhang J, Yang WQ, Zhang GQ, Wang YJ (2009). Spatial distribution characteristics of forest organic carbon stock in Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1217–1225. (in Chinese with English abstract) [黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆, 王永军 (2009). 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. 生态学报, 29, 1217–1225.]

Li B, Fang X, Li Y, Xiang WH, Tian DL, Chen XY, Yan WD, Deng DH (2015). Dynamic properties of soil organic carbon in Hunan's forests. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4265–4278. (in Chinese with English abstract) [李斌, 方晰, 李岩, 项文化, 田大伦, 谌小勇, 闫文德, 邓东华 (2015). 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态. 生态学报, 35, 4265–4278]

Li KR, Wang SQ, Cao MK (2003). Carbon storage of vegetation and soil in China. *Science in China* (*Series D*), 33, 72–80. (in Chinese with English abstract) [李克让, 王绍强, 曹明奎 (2003). 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学(D辑), 33, 72–80.]

Li TT, Ji HB, Sun YY, Luo JM, Jiang YB, Wang LX (2007). Advances in researches on soil organic carbon storages and affecting factors in China. *Journal of Capital Normal University* (*Natural Science Edition*), 28, 93–97. (in Chinese with English abstract) [李甜甜, 季宏兵, 孙媛媛, 罗建美, 江用彬, 王丽新 (2007). 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 首都师范大学学报: 自然科学版, 28, 93–97.]

Luo JY, Zhang XQ, Wang XK, Zhu JH, Hou ZH, Zhang ZJ (2009). Forest biomass estimation methods and their prospects. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(8), 129–134. (in Chinese with English abstract) [罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 侯振宏, 张治军 (2009). 森林生物量的估计方法及其研究进展. 林业科学, 45(8), 129–134.]

Nong SQ, Zhang W, Cai HD (2014). The dynamic change and main driving factors of forest resources in Guangxi from 1977 to 2010. *Guangxi Forestry Science,* 43, 171–178. (in Chinese with English abstract) [农胜奇, 张伟, 蔡会德 (2014). 1977–2010年广西森林资源变化动态及其主要驱动因素分析. 广西林业科学, 43, 171–178.]

Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenklo A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala S, McGuire AD, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988–993.

Shao YH, Pan JJ, Sun B (2005). Study on characteristics of soil organic carbon decompositions and carbon pool under different vegetations. *Journal of Soil and Water Conservation*, 9(3), 24–28. (in Chinese with English abstract) [邵月红, 潘剑君, 孙波 (2005). 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究. 水土保持学报, 9(3), 24–28.]

Wang SQ, Zhou CH (1999). Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research*, 18, 349–356. (in Chinese with English abstract) [王绍强, 周成虎 (1999). 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 18, 349–356.]

Wang XC, Qi G, Yu DP, Zhou L, Dai LM (2011). Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 2013–2020. (in Chinese with English abstract) [王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民 (2011). 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 22, 2013–2020.]

doi: 10.17521/cjpe. 2015.0199

Wei YW, Yu DP, Wang QJ, Zhou L, Zhou WM, Fang XM, Gu XP, Dai LM (2013). Soil organic carbon density and its influencing factors of major forest types in the forest region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 3333–3340. (in Chinese with English abstract) [魏亚伟, 于大炮, 王清君, 周莉, 周旺明, 方向民, 谷晓萍, 代力民 (2013). 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素. 应用生态学报, 24, 3333–3340]

Xie XL, Sun B, Zhou HZ, Li ZP (2004). Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China. *Acta Pedologica Sinica*, 41, 687–699. (in Chinese with English abstract) [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩 (2004). 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, 41, 687–699.]

Xu YZ, Jiang MX (2015). Forest carbon pool characteristics and advances in the researches of carbon storage and related factors. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 926–933. (in Chinese with English abstract) [徐耀粘, 江明喜 (2015). 森林碳库特征及驱动因子分析研究进展. 生态学报, 35, 926–933.]

Yu DS, Shi XZ, Sun WX, Wang HJ, Liu QH, Zhao YC (2005). Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1 000 000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 639–646. (in Chinese with English abstract) [于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存 (2005). 基于1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报, 16, 2279–2283.]

Zhang Y, Shi XZ, Zhao YC, Yu DS, Wang HJ, Sun WX (2008). Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China. *Environmental Science*, 29, 2314–2319. (in Chinese with English abstract) [张勇, 史学正, 赵永存, 于东升, 王洪杰, 孙维侠 (2008). 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究. 环境科学, 29, 2314–2319.]

Zhou YR, Yu ZL, Zhao SD (2000). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytoecolgica Sinica*, 24, 518–522. (in Chinese with English abstract) [周玉荣, 于振良, 赵士洞 (2000). 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 24, 518–522.]

责任编委: 王根绪 责任编辑: 李 敏